

リビアのDerna (El-Bilad) and Abu Mansour ダム決壊洪水に関する 災害後緊急調査

角 哲也*・Sameh Kantoush*, Hammouda Boutaghane**, Jalel Aouissi***,
Abdelwanis Achour****, Jalal Al Quarloti*****

*

* 京都大学防災研究所

** Annaba University, Algeria

*** INAT, Tunisia

**** Omar Al Mokhtar University, Libya

***** Expert, Jordan

要 旨

近年、中東・北アフリカ地域の乾燥・半乾燥地域のワジ（涸れ）川流域において、フラッシュフラッドが頻発しており、地球温暖化の影響とも指摘される。2023年9月に地中海で発生したメディケーン・ダニエルがリビアの北東海岸に位置するワジ・デルナ (Derna) に豪雨をもたらし、流域に設置されていた2つのダムが決壊した。その結果、大規模な洪水が下流のデルナ市街地を襲い、壊滅的な被害を発生させた。ダムの決壊原因は、構造的な欠陥および洪水吐の放流能力を超える洪水の発生の複合的な原因が想定されている。京都大学防災研究所では、現地の研究者と連携してダム決壊の原因と下流被害を明らかにするための現地調査を実施した。その結果、ダムの越流決壊の状況を明らかにするとともに、下流への洪水や土砂の氾濫堆積状況に関する詳細なデータを取得することができた。

1. はじめに

近年、中東・北アフリカ地域の乾燥・半乾燥地域のワジ（涸れ）川流域において、フラッシュフラッドが頻発しており、地球温暖化の影響とも指摘される。ここで、ワジの洪水の特徴は、1）平常時は全く水が流れていないが、総降雨量10～15mm程度でもほとんど地下に浸透せず表面流出となり、急激に洪水流が押し寄せてくる、2）河床には砂を中心に、角礫を含む砂礫が厚く堆積し、洪水時には短時間の急激な土砂移動が発生していることが想像される、3）表流水はないが、砂礫層の下に地下水が流れ、これを取水して生活するために、ワジ近傍に農地や住居が所在している、4）人口増加により居住地の拡大が求められワジの下流地域が開発されることで洪水リスクが増大している、ことにある。

京都大学防災研究所では、このようなフラッシュフラッド洪水の発生メカニズムの解明や対策手法の

開発について、エジプト、オマーン、ヨルダン、モロッコ、アルジェリア、UAE、スーダンなどとともに研究ネットワークを形成して交流を進めてきた（中東・北アフリカにおけるワジ・フラッシュフラッドの統合リスク管理に関する拠点形成（JSPS-研究拠点形成事業－B. アジア・アフリカ学術基盤形成型(Core to Core)）(Sumi et al. 2022)。

こうした中で、2023年9月に地中海で発生したメディケーン・ダニエルが北アフリカのリビアの北東海岸に位置するワジ・デルナに豪雨をもたらし、流域に設置されていた2つのダム(Derna (El-Bilad) and Abu Mansour dams)が決壊した(2023.9.11)。その結果、大規模な洪水が下流のデルナ市街地を襲い、壊滅的な被害を発生させた。ダムの決壊理由としては、今回の洪水がダムの洪水吐の放流能力をはるかに超えたためにダムの越流が発生したことや、リビアの政治的な混乱もあって構造的な欠陥が放置されていたことが指摘されている。

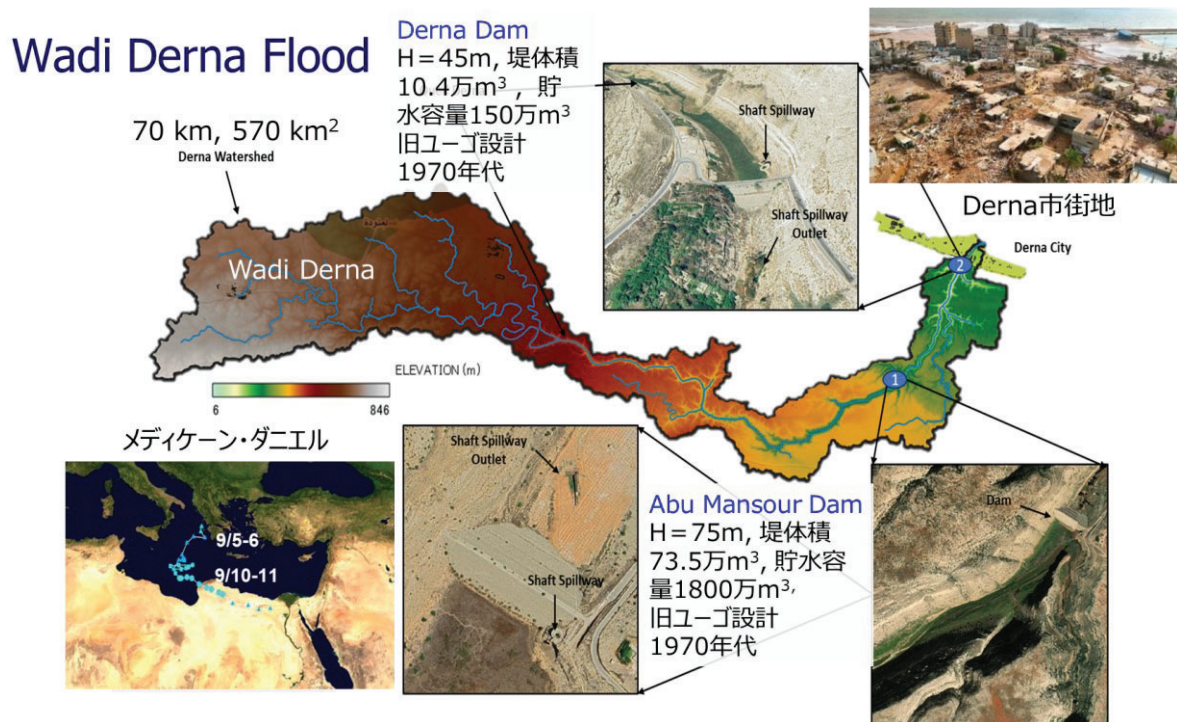


図1 デルナ流域と2つのダム（Abu Mansour（上流）、Derna（下流）dam）

京都大学防災研究所では、このダムの決壊洪水に関して、現地の研究者と連携してダム決壊の原因と下流被害状況を明らかにするための現地調査を実施した（2023. 11. 12-16）。ここでは、今回の洪水の概要を整理するとともに、ダムの越流決壊の状況や下流への洪水や土砂の氾濫堆積状況に関して現地調査で明らかとなったことを紹介する。

2. ワジ・デルナで発生した洪水の概要

リビアのデルナで最近発生した壊滅的な洪水は、地中海に発生した「メディケーン」と呼ばれる低気圧で、発達して地中海沿岸に強風や大雨をもたらした。ここでは、その洪水被害の概要を示す。

2.1 ワジ・デルナの流域特性

デルナ流域は、リビアの北東海岸に位置し、東西約75kmの流程、約557km²の面積を占めている（図1）。この流域は、Jabel Al Akhdarとして知られる広大な高原の一部であり、3つの区間に分けられる。(1) 上流: 集水域の約345 km²を占めるこの地域は、年間降雨量が多く、平均約400 mmである。(2) 中流: Al-Washka山脈とAbu Mansour ダムの間に位置し、約140 km²の面積を占め、年間平均降雨量は約150 mmである。(3) 下流: Abu Mansourダムから地中海まで広がるこの区間は、年間平均降雨量が約250 mmであり、洪水の主な収束点としてDerna（EL Bilad）ダムに集まり、最終的にデルナ市街地に流れ下る。

2.2 メディケーン・ダニエルと異常豪雨

メディケーンは、中心に暖かい空気があり、台風の目に類似している。秋から冬にかけて地中海の西部で最も多く発生し、半径は200キロ程度と小型であり、気象衛星が普及した1980年代ごろから多く観測されるようになった。9月4日に地中海のギリシャ上空で発生したダニエルは、9/5-6の24時間に750mmの降雨をもたらした。一般にメディケーンがリビアに近づくケースは少ないが、今回は地中海の海水温が高く、ダニエルが発達して勢力を増しながらリビアに上陸し、この地域に異常な豪雨をもたらした。

この地域の年間降雨量は200～400mm（1960-2000）であるのに対して、もたらされた降雨量（9/10-9/11）は150～240mm/24hr（Al-Bayda: 414mm/24hr）であり、一部の地域ではわずか 24時間の間に18か月分に匹敵する降雨量が記録された。参考までに、9/11午後 の GSMaP（JAXA）の降雨観測状況を図2に示す。これまでの分析では33 mm/24hrが1/150確率、400 mm/24hrは1/1500確率と推定されている。

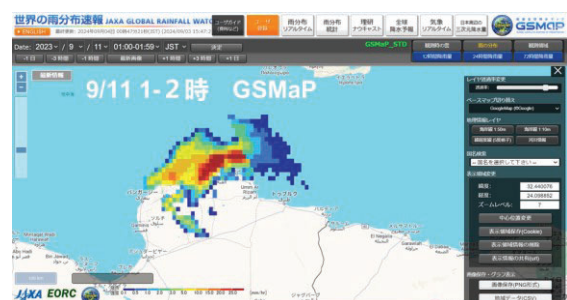


図2 9/11のGSMaPの降雨観測状況（JAXA）

2.3 下流の被害状況

ワジ・デルナに建設された2つのダムは、洪水防御に加えて、地下水の涵養と農地への灌漑用水を供給する目的として設計された。ダムの貯水容量(1985年時点)は、それぞれ上流のAbu Mansourダム(2,370万 m^3)と下流のDerna (EL Bilad) ダム(115万 m^3)であり、これを単純に上流と中流の流域面積485 km^2 で割れば、51mmの降雨量に相当する。今回の豪雨によってもたらされた洪水量は、ダムの容量を大きく超過して満水にするとともに、これを越流して下流に押し寄せた結果、下流のデルナ市街地が広範囲に浸水した。その破壊力は甚大であり、河道に架かる5橋が落橋し、港湾も大きく損傷した。

デルナ市街の氾濫面積は6 km^2 に及び、破壊された家屋が891棟、氾濫に伴う土砂堆積が398棟に上っている。人的被害は、死者が5000人以上、行方不明者が1万人以上、負傷者が4万人とも数えられている。

3. ワジ・デルナのダム建設と決壊原因

1970年代に、旧ユーゴスラビアの企業によって、デルナ流域内にAbu MansourダムとDerna (EL Bilad) ダムが建設された。ここでは、これまでの洪水履歴、ダムの決壊原因の推定を整理する。

3.1 過去の洪水事例とダムによる洪水対策

デルナ市街地は、比較的標高が低く平均標高は海拔約10mである。この土地は、もともとワジ・デルナの氾濫原であり、度重なる洪水と土砂の堆積によって形成された洪水に対して脆弱な地理的条件を有している。デルナ流域では、以下のように度重なる突発的な洪水が発生したことが記録されている。

- ・第二次世界大戦中の1941年に、ワジ・デルナとワジ・アルナカに流れ込んだ大洪水によってドイツ軍の戦車が流されたことが記録されている。ただし、戦時下のために被害記録は限定的である。
- ・1956年にも大洪水が発生したが、デルナ市街には大きな被害はなかった。
- ・1959年の大洪水により人的および物的損失が発生し、洪水により橋の1つが一時的に閉鎖された。
- ・1968年10月に大雨により大洪水が発生したが、大きな被害はなかった。
- ・1986年の洪水は、2つのダム建設後に発生した。下流のDernaダムは漏水による軽微な被害を受けたが、上流のAbu Mansourダムは洪水を効果的に貯留し、さらなる被害の増大を防止した。
- ・最近の洪水は2011年11月3日に発生し、洪水がダムの洪水吐から放流された。洪水の強さは中程度であり、市内の道路が冠水した。

3.2 ダムの決壊原因の推定

デルナのダム決壊の具体的な原因は、入手可能なデータが限られているため不明の点が多い。しかし、これまでの検討で、構造上の弱点や前例のない洪水量など、いくつかの要因がこれらの決壊に寄与していることが示唆されている。

(1) 構造上の弱点

ダムには、洪水を制御する底部放流ゲートは設置されていない。2つのダムともに、余水吐きとしてはシャフト式(朝顔形)の洪水吐が設置され、それぞれ、上流のAbu Mansourダムが、直径3.5mのトンネルで放流能力が170 m^3/s 、下流のDernaダムが、直径6mで放流能力が350 m^3/s であった。これらのシャフト式の洪水吐は、フラッシュフラッドがもたらす急激な水位上昇と流量増加を安全に処理するには不十分であると考えられた。

それ以外にも、Abu Mansourダムでは、ダム堤体からの漏水が発生していたほか、Dernaダムでは、ダム堤体の右岸側でダム天端の沈下(15 cm)が確認されており(2006)、その改修提案がなされていた。しかしながら、リビアの国内政治事情により適切な対策が取られていなかったことも、今回のダム決壊の要因の一つとして挙げられている。

(2) 異常洪水の発生

1970年代にダムが建設された際に想定されたダムの洪水吐の能力を求める設計洪水流量は、1/1000年確率流量で、上流Abu Mansourダムで、ピーク流入量が840 m^3/s 、洪水流入水量1400万 m^3 であり、ダムの貯水容量が洪水流入水量を上回るために、その貯留効果を考慮して、洪水吐の放流能力として170 m^3/s が提案されていた。同様に、下流Dernaダムでは、ピーク流入量が350 m^3/s 、洪水流入水量400万 m^3 であり、この場合は、貯水容量が洪水流入水量を下回ることから、洪水吐の放流能力としてピーク流入量と同等の350 m^3/s が提案されていた。

これに対して、今回の洪水で推定されている洪水ピーク流入量は上流Abu Mansourダム地点で約2,000 m^3/s 以上、洪水流入水量8,000万 m^3 以上と推定され、上記のダムの貯水容量や洪水吐の放流能力を大きく上回っている。

なお、今回のワジ・デルナの洪水では、雨域が西から東に移動したことが衛星データからも明らかである。一般に、河川にとって洪水量が大きくなるのは、主流に沿って上流から下流に向かって雨域が移動する場合であり、今回の降雨がそれに該当する厳しい降雨パターンであったことが推定される。

4. 現地調査

京都大学防災研究所は、ダム決壊や下流の被害状況を明らかにするために、リビアのオマール・アル・ムクター大学と連携して災害後の現地調査を実施した。日本からは現地に直接渡航することが困難だったため、現地調査は、当事国のリビアの研究者に加えて、これまで培ってきたフラッシュフラッドの研究ネットワークを活用して、近隣国のアルジェリア、チュニジアやヨルダンからの専門家の応援を得て2023年11月11日から16日まで実施された。

現地調査は、主に、貯水池および河道の洪水痕跡や土砂の堆積状況とサンプリング、デルナ市街地域の洪水痕跡や土砂の堆積状況とサンプリングなどを目的に実施された。

(1) Abu Mansour ダムの状況

上流に位置するAbu Mansourダムの構造図と決壊前の写真を図3に示す。ダムは堤高75m（河床から45m）のロックフィルダムであり、シャフト式（朝顔形）の非常用洪水吐が設置されている。決壊後のダムの状況を写真1～3および図4（ドローン空撮データより生成）に示す。円筒状の取水塔の上部に洪水痕跡が残されており、ダムの天端を超える洪水が流下したことが明確である。また、写真2や図4で示すように、堤体直下流に深掘れ穴が形成されており、ダムを越流した際の落下水により洗掘されたものと推定される。

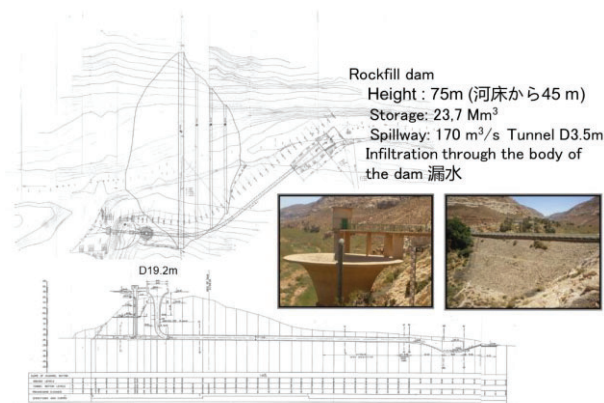


図3 Abu Mansourダムの構造図と決壊前の写真



写真1 Abu Mansourダム（決壊後）から上流を望む



写真2 Abu Mansourダム（決壊後）と河床状況

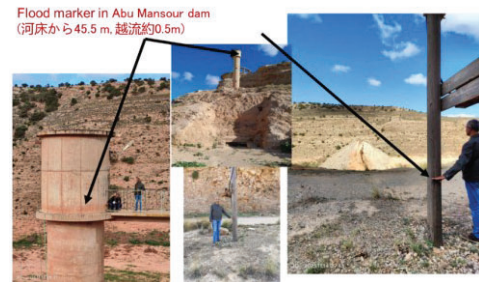


写真3 Abu Mansourダム（決壊後）の越流状況

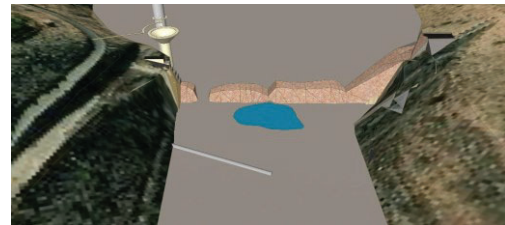


図4 Abu Mansourダム（決壊後）付近の模式図

(3) Derna ダムの状況

下流に位置するDerna (EL Bilad) ダムの構造図と決壊前の写真を図5に示す。ダムは堤高40m（河床から25m）のロックフィルダムであり、同様にシャフト式（朝顔形）の非常用洪水吐が設置されている。

決壊後のダムの状況を写真4および図6に示す。洪水痕跡からはダムを約6m越流したものと推定されている。なお、上流ダムと異なり、円筒状の取水塔が完全に倒壊していることがわかる。これは、上流ダムの決壊に伴う洪水の段波が下流ダムに流下して取水塔を押し倒したことが考えられる。

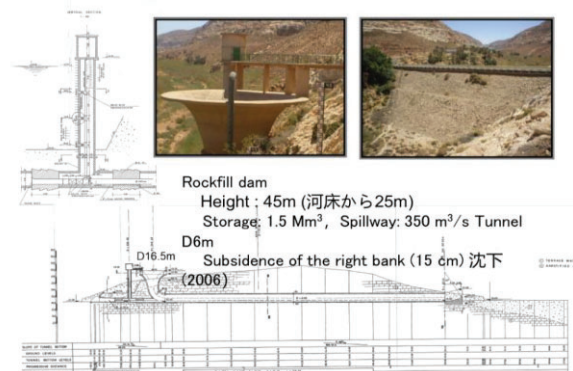


図5 Dernaダムの構造図と決壊前の写真



写真4 Dernaダム（決壊後）と河床状況

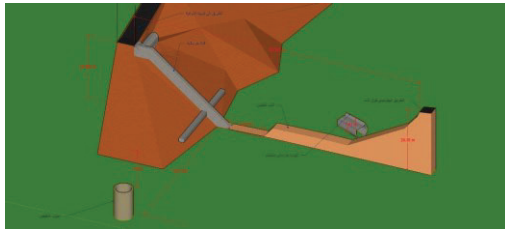


図6 Dernaダム（決壊後）付近の模式図

(4) デルナ市街の状況

デルナの人口は約10万人（2011年）であり、写真5に示すように、中心部をワジ・デルナが流れるワジと共存する町であった。これが、写真6のように洪水の影響で大きく浸水被害を受け、ワジの近くに残されたモスクで3.85mの浸水深であったことが調査により明らかになった。また、写真7に示すように、家屋の2階に達する被害が確認されるとともに、道路部には洪水によってもたらされた大量の土砂が堆積している状況である。

これらの土砂の起源は明確ではないが、洪水によって上流のワジの河床や河岸が侵食されたものと、2つのダム（特に、上流のAbu Mansourダム）の貯水池内に堆積していた土砂が決壊とともに流出したものが合算されている可能性が考えられる。

デルナ市街地の浸水深を調査したポイントごとに図示したものを図7に示す。これによれば、ワジの河道近くで高いところで約12m、河道から数百m離れた場所で約3m程度の浸水深があったことがわかる。



写真5 デルナ市街地の洪水前の状況（UNESCO提供）



写真6 デルナ市街地の洪水前後の比較



写真7 デルナ市街地の洪水被災状況（土砂堆積）

5. まとめと今後の課題

これまでに得られた情報をとりまとめるとともに、今後の課題について整理する。

5.1 ダム決壊に関して得られた情報の整理

- ・ダム決壊の主な原因は、ダム天端を越水する規模の洪水が流入したことに伴う越流決壊であり、両方のダムの目撃者によれば、下流のダムが先に決壊し、1時間後に上流ダムが決壊したとされている（（下流）2023年9月11日午前1時30分、（上流）午前2時30分）。
- ・デルナ流域で記録された豪雨強度は最大400mmであり、2003年のスイス企業Stucky社の研究と2008年以降の研究でも指摘されていたように、建設当時の降雨データが不十分だったため、設計洪水流量の推定が不正確であった。
- ・過去の洪水、特に、1986年の洪水時にダム堤体に亀裂が発生していた。ダムの定期的なメンテナンスと、建設から崩壊時までのフィルダムの浸潤線に沿った水の浸透の監視が欠如していた。
- ・また、ダム貯水池に堆積した土砂は、ダム構造にさらなる負荷を与え、ダムの高さと貯水容量を低下させていたが、十分な対策がなされていなかった。



図7 ワジ・デルナとデルナ市街地の浸水深分布

- ・シャフト式（朝顔形）洪水吐の直径（放流能力）が小さいため、洪水の放流に適切に対処できず、ダムが越流してしまった可能性が高い
- ・両方のダムの高さを下げながら洪水吐を追加し、ダムが越流するのを防ぐという勧告が2003年以来行われていたが、これが履行されていなかった
- ・ワジ・デルナの上流域にさらに別のダムを建設し、Abu Mansourダムへの洪水外力を軽減する勧告が2003年以来行われていたが、未実施であった

5.2 今後の課題

- ・ワジ・デルナを含めたワジのフラッシュフラッドの降雨量および洪水量の頻度分析
- ・メディケーン・ダニエルのような低気圧の発生予測と早期警戒体制の確立
- ・デルナ市の都市化の進行が、洪水リスクを増大させた要因
- ・ダムの決壊分析とモデル化
- ・フラッシュフラッドの流下モデルの高度化
- ・ダムの堆積土砂の起源と伝播
- ・洪水リスクを軽減するための改善方策（上流域における流出抑制・洪水貯留戦略、ダム構造物の強化、氾濫原における洪水リスクの低減方策など）

6. おわりに

これまで、乾燥・半乾燥地域のフラッシュフラッドに関する研究を進めてきたが、今回のデルナの洪水は、降雨量、雨域規模のどちらを取っても大きく想定を上回るものと考えられる。今後、気候変動によって今回のような大規模な降雨イベントが増大す

ることを想定すれば、これら地域の洪水対策を大幅に見直す必要があるものと考えられる。

一方、気候変動により渇水はより厳しくなることが想定されており、貴重な水資源である洪水を効果的に貯留して、地下水に涵養するなどの対策が一層求められる状況にある。このため、ダム施設の安全性を向上させるための、洪水予測モデルの高度化と洪水吐の機能強化、ダムの洪水量の不確実性に対して強靱な構造設計（越流に強い台形CSG（Cemented Sand Gravel）ダムの導入など）などのソフト・ハードの両面からの日本の貢献が求められる。

なお、第8回ワジのフラッシュフラッドに関する国際会議（ISFF）をUAEで開催し、リビアのダム決壊洪水を含めた最新の情報交換を予定している。

<https://conferences.uaeu.ac.ae/isff8/en/index.shtml>

謝 辞

本調査の実施にあたり自然災害研究協議会の災害調査支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- Tetsuya Sumi, Sameh A. Kantoush, Mohamed Saber, editors(2022) : Wadi Flash Floods, Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction, Springer.
- International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank (2024): Breaking Point, An Assessment of the Potential Failure Modes of the Wadi Derna Dams (in Press)